

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПРОВОЛОКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. М. РИККОНЕН, Ю. С. МЕЛЬНИКОВ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

В настоящее время в кабельной промышленности уделяется большое внимание созданию непрерывных технологических процессов. Одним из вопросов, которые требуют разрешения при этом, является отжиг проволоки. По новой технологии отжиг стали осуществлять за счет кратковременного пропускания через проволоку электрического тока большой величины. Однако теория нагрева движущейся проволоки еще разработана недостаточно полно. В работе авторов [1] приводится анализ динамики нагрева проволоки в стационарном режиме, то есть при установившихся значениях скорости движения проволоки, тока отжига и постоянных длинах участков отжига. Получены выражения для перегрева проволоки над окружающей средой, определен закон регулирования режимом отжига и основные факторы, влияющие на процесс нагрева. Исходя из этого, определены основные параметры установки электрического отжига проволоки: длины участков отжига и напряжения отжига при разных скоростях движения проволоки.

Так как отжигаемый участок проволоки является объектом регулирования, требуется определить его динамические свойства, то есть закон изменения конечной температуры проволоки при подаче на нее напряжения.

Первая попытка получить аналитические выражения для конечной температуры проволоки сделана К. Д. Колесниковым в работе [2]. Однако при анализе автор от уравнения теплового равновесия для элементарного звена проволоки переходит к уравнению теплового равновесия для всего отжигаемого участка. При этом, естественно, температура элементарного звена заменяется средней температурой проволоки всего участка. Но качество отжига проволоки определяется конечной температурой на выходе участка отжига, а распределение температуры по длине отжигаемого участка имеет нелинейный характер [1], следовательно, среднюю температуру проволоки на участке нельзя рассматривать как основную характеристику качества отжига.

Настоящая же работа посвящена определению действительного закона изменения конечной температуры проволоки во времени при подаче на нее напряжения, то есть определению кривой качества переходного процесса.

Чтобы установить этот закон, прежде всего требуется знать характер изменения плотности тока в двух плечах отжигаемого участка проволоки, которая, как показано в [1], является основной величиной, определяющей степень отжига проволоки. Для этого нужно определить из-

менение интегральных по длине значений сопротивления обоих участков отжига во времени. Аналитическое решение задачи невозможно, так как уравнение теплового равновесия с учетом действительной температуры для всего отжигаемого участка составить нельзя, поскольку даже в установившемся режиме при $\sigma_1 = \text{const}$, $\sigma_2 = \text{const}$, $L_1 = \text{const}$, $L_2 = \text{const}$, $v = \text{const}$ все точки проволоки находятся в различных условиях (нелинейное распределение температуры по длине участка отжига). Решение же задачи численными методами требует больших затрат времени и большого объема графических работ.

Поэтому авторами выбран путь, позволяющий учесть особенности работы созданной установки электрического отжига проволоки. На установке, работающей в производственных условиях, заосциллографированы кривые изменения плотности тока отжига в двух плечах при подаче напряжения постоянной амплитуды, которые представлены на рис. 1.

Характер кривых $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$ в основном определяется длиной участков отжига и скоростью движения проволоки.

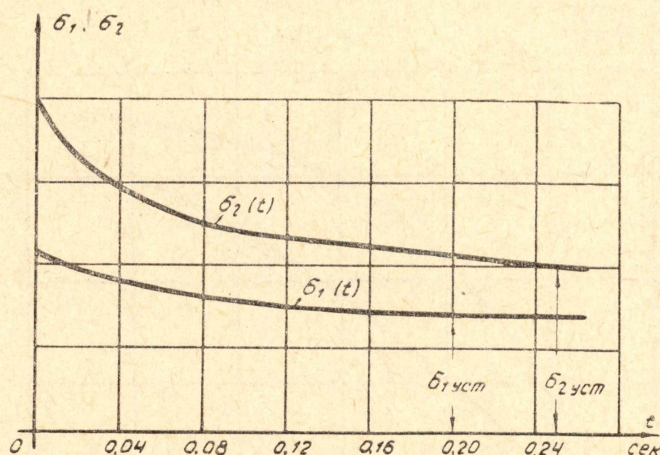


Рис. 1. Изменение плотностей тока в двух плечах отжига.

Установившиеся значения плотностей тока в обоих участках в зависимости от напряжения отжига определяются по формулам, выведенным в [1]:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{v}{L_1 \cdot k_1} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Theta_{k1}}{\tau_0 + \tau_{H1}} \right)}, \quad (1)$$

$$U = \frac{v \cdot \gamma \cdot c \cdot \Theta_{k1}}{\sigma_1}, \quad (2)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\Theta_{k2}^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{\Theta_{k1}}{\tau_0 + \tau_{H1}} \right)}{\Theta_{k1}^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{\Theta_{k2}}{\tau_0 + \tau_{H2}} \right)}, \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{v}{L_2 \cdot k_1} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Theta_{k2}}{\tau_0 + \tau_{H2}} \right)}. \quad (4)$$

Принятые обозначения:

$$k_1 = \frac{1}{c \gamma \cdot \tau_{H1} (235 + \tau_{H1})}; \quad (5)$$

σ_1 и σ_2 — плотности тока на первом и втором участках;
 L_1 и L_2 — длины первого и второго участков;
 $\Theta_{к1}$ и $\Theta_{к2}$ — конечный перегрев проволоки над окружающей средой на первом и втором участках;
 $\tau_{н1}$ и $\tau_{н2}$ — начальная температура проволоки на первом и втором участках;

$$\tau_{н2} = \tau_{н1} + \Theta_{н2};$$

U — напряжение отжига;
 v — скорость движения проволоки;
 γ — удельный вес материала проволоки;
 c — удельная теплоемкость материала проволоки;
 η_n — удельная электропроводность материала проволоки при $\tau = \tau_n$.

На рис. 2 приведены зависимости $\sigma_{1\text{уст}} = f(U)$ и $\sigma_{2\text{уст}} = f(U)$ при $L_1 = 2,47$ м, $L_2 = 1,29$ м, $v = 12,2$ м/сек для медной проволоки.

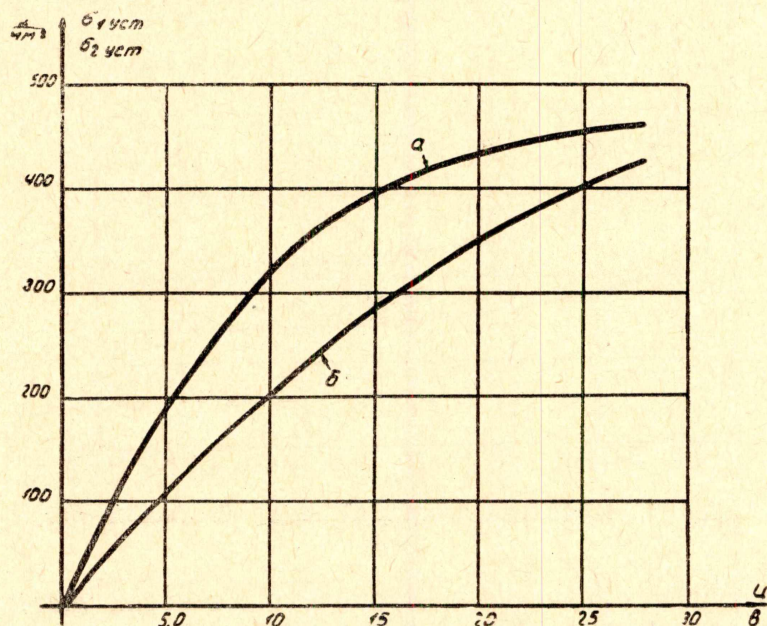


Рис. 2. Зависимости установившихся значений плотностей тока от напряжений отжига: а) для второго участка отжига; б) для первого участка отжига.

Для определения конечного перегрева проволоки при известном законе изменения плотностей токов отжига во времени используем уравнение теплового равновесия для элементарного участка проволоки в следующем виде [1]:

$$\frac{\sigma^2}{\gamma \cdot \eta_r} \cdot dt = c \cdot d\Theta, \quad (6)$$

где

$$\eta_r = \frac{\eta_n (235 + \tau_n)}{(235 + \tau_n + \Theta)}; \quad (7)$$

η_r и η_n — соответственно, удельная электропроводность материала проволоки в горячем и холодном состоянии;

Θ — текущий перегрев проволоки над окружающей средой.

Выражение (6) перепишем с учетом (7)

$$dt \frac{\sigma^2}{\gamma \cdot \eta_{\text{н}} (235 + \tau_{\text{н}})} \cdot (235 + \tau_{\text{н}} + \Theta) = c \cdot d\Theta. \quad (8)$$

Учитывая (5), получим

$$\sigma^2 k_1 (235 + \tau_{\text{н}} + \Theta) = \frac{d\Theta}{dt}. \quad (9)$$

Решение задачи производим на моделирующей установке типа МНБ-1. Набор задачи разделим на два этапа: первый — набор зависимостей $\sigma_1 = f(U, t)$ и $\sigma_2 = f(U, t)$, второй — набор дифференциального уравнения (9) для двух участков отжига.

Полная структурная схема модели представлена на рис. 3.

Звенья 1 и 2, моделирующие зависимости $\sigma_1 = f(U, t)$ и $\sigma_2 = f(U, t)$, составим по второму способу набора задачи, то есть по структурной

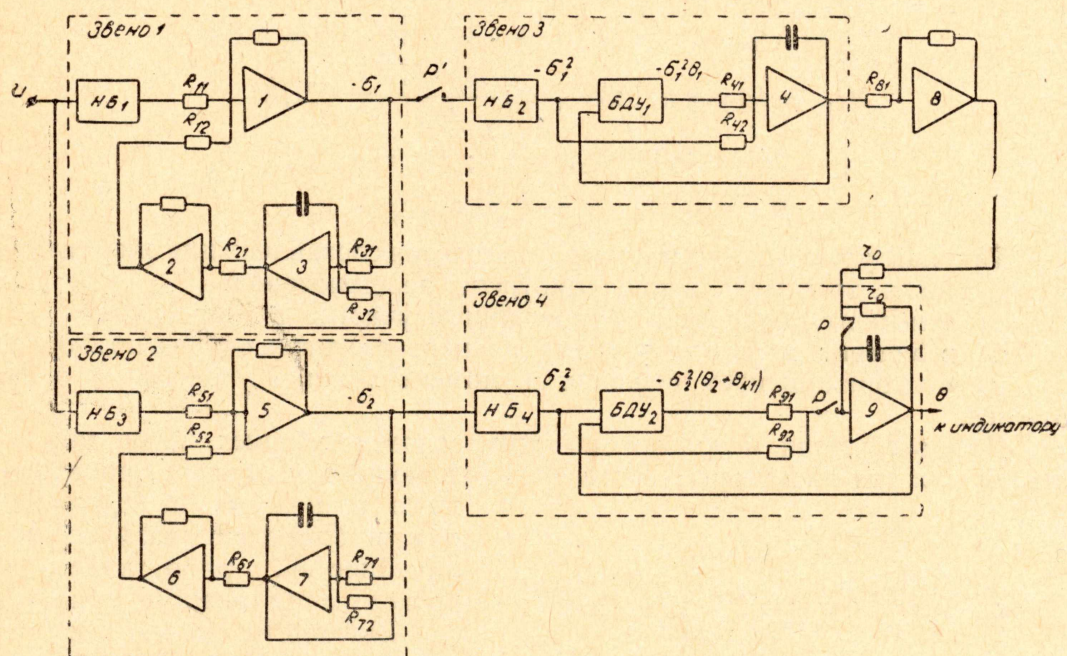


Рис. 3. Структурная схема модели.

схеме звеньев. По известной методике [3], определяем передаточные функции звеньев, переходные процессы которых представлены на рис. 1: для первого участка отжига

$$W_{1(p)} = \frac{\sigma_1(p)}{U(p)} = k'_1 \frac{0,0981 p + 1}{0,0644 p + 1};$$

для второго участка отжига

$$W_{2(p)} = \frac{\sigma_2(p)}{U(p)} = k'_2 \frac{0,118 p + 1}{0,06 p + 1},$$

где

$$k'_1 = \frac{\sigma_{1 \text{ уст}}}{U}; \quad k'_2 = \frac{\sigma_{2 \text{ уст}}}{U}.$$

Коэффициенты k'_1 и k'_2 вводим в структуру модели нелинейными блоками НБ₁ и НБ₃, которые воспроизводят зависимости $\sigma_{1 \text{ уст}} = f(U)$ и $\sigma_{2 \text{ уст}} = f(U)$.

По уравнению (9) для двух участков отжига составляем звенья 3 и 4, дающие зависимости: $\Theta_1 = f(\sigma_1, t)$ и $\Theta_2 = f(\sigma_2, \tau_{н2}, t)$.

Особенностью электрического отжига проволоки на двух участках является то, что начальная температура проволоки на втором участке зависит от конечной температуры на первом участке. В [1] показано, что теплоотдачей проволоки при электрическом отжиге можно пренебречь, поэтому принимаем $\Theta_{н2} = \Theta_{к1}$, а на модели выход блока 4 подаем как начальное условие на вход блока 9.

Принятые масштабы для набора модели:

$$M_t = 0,05; M_u = 0,5; M_\sigma = 9,18;$$

$$M_\Theta = 10; M_{\sigma^2} = 8420; M_{\sigma^2\Theta} = 5,05 \cdot 10^6.$$

Значения коэффициентов модели, определенные по принятым масштабам и параметрам установки:

$$R_{11} = 0,844; R_{12} = 1,0; R_{21} = 1,0; R_{31} = 0,267;$$

$$R_{32} = 0,51; R_{41} = R_{91} = k_1 \cdot M_{\sigma^2} \cdot M_t \cdot 100 = 0,834;$$

$$R_{42} = R_{92} = k_1 (235 + \tau_{н}) \frac{M_{\sigma^2} \cdot M_t}{M_\Theta} = 0,213;$$

$$R_{51} = 1,07; R_{52} = 1,0; R_{61} = 1,0;$$

$$R_{71} = 0,41; R_{72} = 0,454; R_{81} = 1,0.$$

Так как уравнение теплового равновесия составлено для элементарного участка, то в модели предусмотрены переключения:

- а) в момент попадания элементарного участка в зону отжига;
- б) в момент перехода участка из первого плеча отжига во второе;
- в) «замораживание» решения в момент выхода участка из зоны отжига.

Для этой цели использовано три вспомогательных цепи управления, каждая из которых состоит из решающего усилителя, работающего в режиме интегрирования, и блока специальных нелинейностей, работающего в программном режиме (рис. 4).

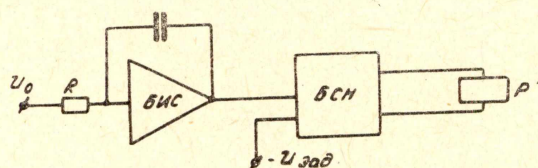


Рис. 4. Вспомогательная цепь управления моделью.

Выходным элементом цепей управления являются реле, контакты которых производят переключения в основной модели задачи.

Реле P' служит для определения зависимости $\Theta = f(U, t)$ для точек проволоки, находящихся в момент включения напряжения перед участком отжига. Выдержка времени его соответствует времени движения исследуемой точки до начала первого участка отжига. Реле P'' (его контакты на рис. 3 не показаны) переводит блок 9 из режима «начальные условия» в режим «интегрирование» в момент перехода точки с первого участка отжига на второй. Реле P''' (его контактов на рис. 3 тоже нет) служит для «замораживания» результата решения задачи. Выдержки времени всех реле строго согласованы для каждой исследуемой точки. По принятой методике можно определить кривую нагрева любой точки проволоки при включении напряжения на участки отжига.

На рис. 5 представлены кривые $\Theta = f(t)$, снятые на модели для двух точек проволоки при подаче на участки отжига напряжения $U = 26$ в.

Кривая 1 принадлежит точке проволоки, нагревающейся при включении напряжения до самой высокой температуры; кривая 2 — точке, попадающей на участок отжига после окончания переходных процессов плотностей токов и соответствующей установившемуся режиму отжига. Кривую 2 можно рассматривать и как распределение перегрева по длине отжигаемого участка проволоки в установившемся режиме при неизменных параметрах установки.

На рис. 6 приведены кривые изменения конечной температуры проволоки при подаче трех значений напряжения отжига, построенные по полученному на модели семейству кривых $\Theta = f(t)$ для различных точек проволоки.

Как показано выше, значение конечной температуры проволоки является основной характеристикой, определяющей качество отжига, поэтому на основании рис. 6 можно сделать следующие выводы.

Включение на проволоку напряжения постоянной величины даже меньше номинального ($U_{\text{ном}} = 26$ в) при неизменной скорости движе-

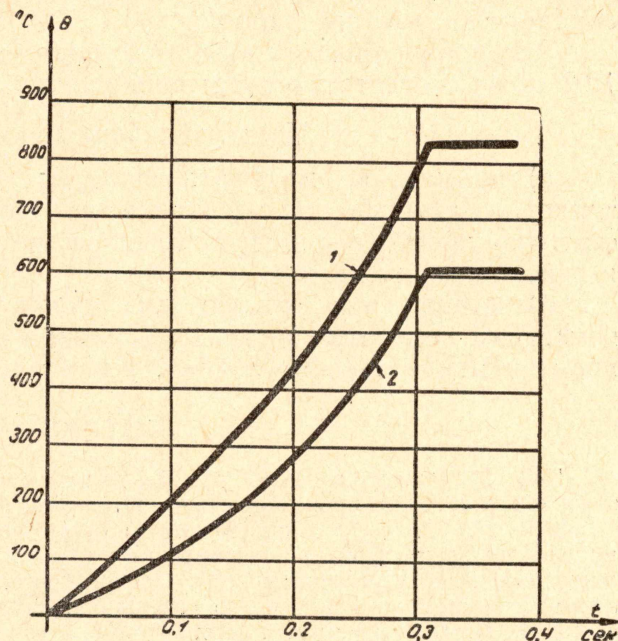


Рис. 5. Изменение перегрева двух точек проволоки при подаче постоянного напряжения отжига $U = 26$ в: 1) для точки, находящейся при $t = 0$ в начале участка отжига; 2) для точки, отстоящей при $t = 0$ на 3 метра от начала участка отжига.

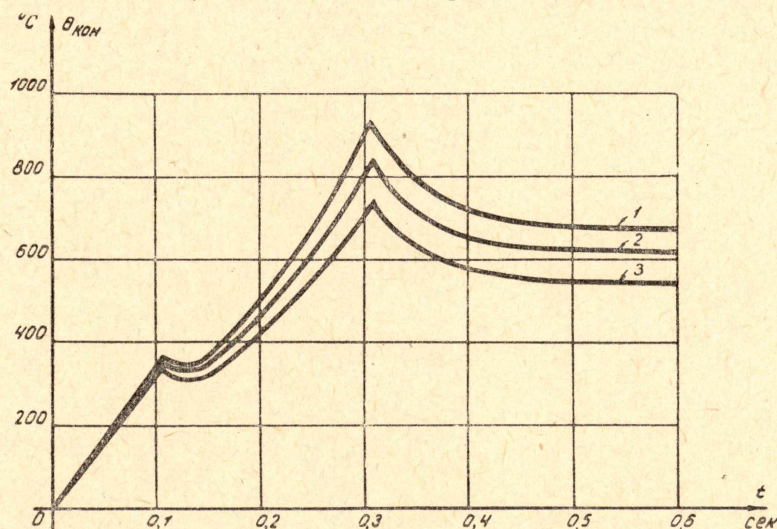


Рис. 6. Изменение конечного перегрева проволоки во времени при подаче постоянных напряжений: 1) $U = 28$ в; 2) $U = 26$ в; 3) $U = 24$ в.

ния ее приводит к браку. Так, при $U = 24$ в $\Theta_{\text{кон. макс.}} = 720^\circ\text{C}$, а по технологическим требованиям и экспериментальным данным для каче-

ственного отжига конечный перегрев проволоки должен быть не выше 620°C.

В момент включения напряжения температура проволоки на всей длине отжигаемого участка резко повышается, проволока удлиняется и спадает с контактных роликов.

Установившийся режим наступает через 0,49 сек., что при $v = 12,2$ м/сек соответствует 6 м проволоки.

Из вышеизложенного следует:

а) применение математического моделирования к исследованию теплового режима при электрическом отжиге проволоки позволяет достаточно просто определить температуру проволоки в установившемся и переходных режимах;

б) напряжение отжига для исключения неотожженных концов и местных пережогов проволоки должно включаться в момент пуска машины и изменяться по закону, установленному в [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Рикконен, Ю. С. Мельников. Расчет параметров электрического отжига движущейся проволоки. Электротехника, № 9, 1964.

2. К. Д. Колесников. Теория и основные принципы построения систем автоматического регулирования совмещенных процессов волочения и отжига переменным током. Сборник «Комплексная механизация и автоматизация кабельного производства» по материалам 2-го Всесоюзного совещания, Ташкент, 1962.

3. И. Н. Печорина. Расчет систем автоматического управления. М.-С., Машгиз, 1962.